

# ВЛИЯНИЕ РКУП В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ НА ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061

**Бобрук Е.В.**

*Руководитель – н.с., к.т.н. Мурашкин М.Ю.*

Институт физики перспективных материалов, Уфимский государственный  
авиационный технический университет, г.Уфа

[e-bobruk@yandex.ru](mailto:e-bobruk@yandex.ru)

В работе рассмотрены особенности формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры и закономерности изменения механических свойств алюминиевого сплава 6061 системы Al–Mg–Si, подвергнутого обработке новым методом интенсивной пластической деформации (ИПД) – равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах (РКУП-ПК) (Рис.1). Метод РКУП-ПК, разработанный в ИФПМ, является развитием метода традиционного РКУП [1].

Экспериментально установлено, что реализации данного метода ИПД позволяет в значительной степени повысить коэффициент использования материала и увеличить производительность процесса получения широкого спектра УМЗ конструкционных материалов. Кроме этого, недавние исследования показали, что в отличие от традиционного РКУП, метод РКУП-ПК может быть адаптирован к условиям серийного производства УМЗ полуфабрикатов в виде прутков, профилей и т.д.

Обработку РКУП-ПК заготовок сплава 6061 с исходной литой структурой осуществляли при температуре 100 и 150°C с количеством циклов 1, 2 и 4, после гомогенизационного отжига 535°C, 5 часов и последующего охлаждения в воду.

Структурные состояния сплава 6061 после обработки РКУП-ПК, исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Установлено, что данный метод ИПД позволяет сформировать однородную УМЗ структуру со средним размером зерен 400 нм (Рис.2) в исходном литом материале уже после 4 циклов обработки при 100°C. Используя же традиционное РКУП, формирование УМЗ структуры в сплаве 6061, достигается только после 8–12 циклов обработки [2], т.е. необходимое количество циклов обработки в 2–3 раза превышает количество циклов РКУП-ПК при аналогичных условиях. Также было установлено, что формирование УМЗ структуры в сплаве сопровождается интенсивным деформационным динамическим старением, в ходе которого

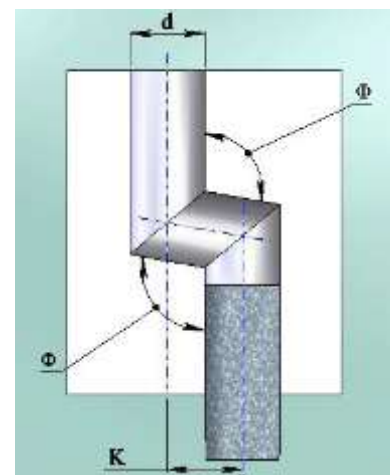


Рис. 1. Схема РКУП-ПК: d - диаметр канала; K - расстояние между осями параллельных каналов; Ф - угол пересечения между параллельными каналами и каналом их соединяющим

образуются наноразмерные частицы упрочняющие фазы  $Mg_2Si$  (Рис.2 область А и В).

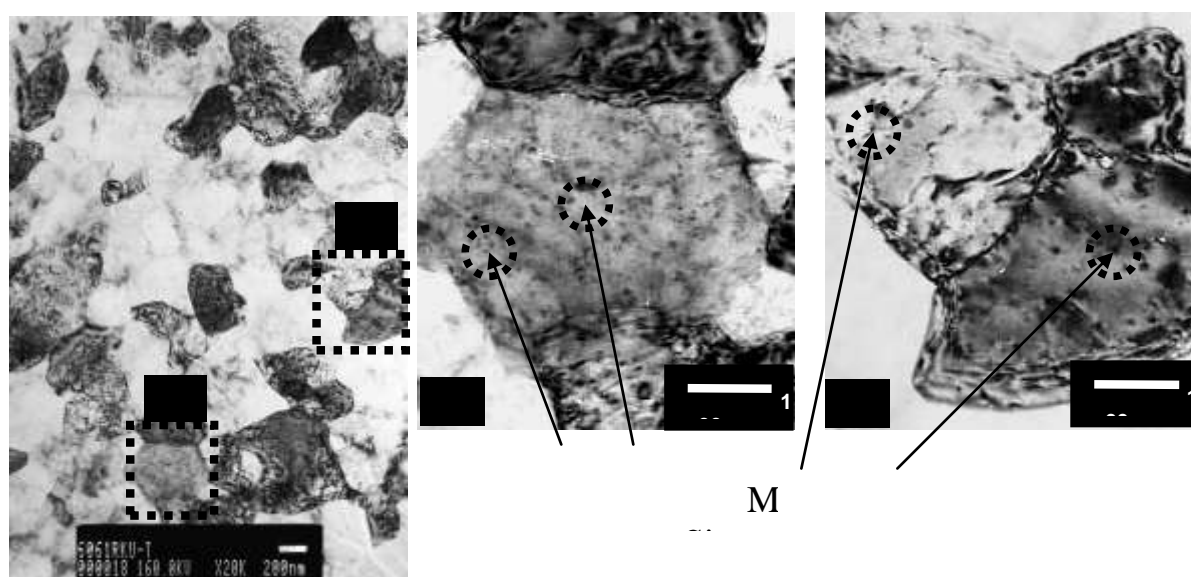


Рис. 2. Микроструктура сплава 6061 после 4 циклов РКУП-ПК при 100°C в продольном сечении заготовки (дисперсные частицы упрочняющей фазы  $Mg_2Si$  выделившиеся в процессе обработки - области А и В)

РСА показал типичное изменение величины среднеквадратичной микродеформации кристаллической решетки алюминиевой матрицы  $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$  и областей когерентного рассеяния ( $D_{OKP}$ ) после формирования в сплаве УМЗ структуры во время ИПД. Кроме этого было установлено значительное уменьшение параметра кристаллической решетки алюминиевой матрицы ( $a$ ), также как и данные ПЭМ, свидетельствующие об образовании частиц упрочняющей фазы  $Mg_2Si$  (табл. 1).

Таблица 1. РСА анализ алюминиевого сплава 6061

| Обработка   | $D_{OKP}$ , нм | $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$ , % | $a$ , Å             |
|---|----------------|---|---------------------|
| Закалка <sup>1</sup>  | -              | -   | $4.0535 \pm 0.0001$ |
| T6 <sup>2</sup>   | -              | -   | $4.0531 \pm 0.0001$ |
| 1 цикл РКУП-ПК при 100°C  | $89 \pm 14$    | $0.14 \pm 0.020$                          | $4.0520 \pm 0.0002$ |
| 4 цикла РКУП-ПК при 100°C   | $106 \pm 10$   | $0.10 \pm 0.010$                          | $4.0506 \pm 0.0001$ |
| 1 цикл РКУП-ПК при 150°C  | $206 \pm 12$   | $0.11 \pm 0.020$                          | $4.0506 \pm 0.0001$ |
| 4 цикла РКУП-ПК при 150°C   | $190 \pm 17$   | $0.12 \pm 0.030$                          | $4.0505 \pm 0.0001$ |
| <sup>1</sup> – отжиг при температуре 535°C и охлаждение в воду,<br><sup>2</sup> – отжиг при температуре 535°C и охлаждение в воду + искусственное старение при температуре 160°C, 12 часов. |                |   |                     |

Механические свойства сплава 6061 после обработки РКУП-ПК оценивали по результатам механических испытаний на растяжение при комнатной температуре (табл. 2).

Установлено, что уже после одного цикла РКУП-ПК исходных литых заготовок в сплаве 6061 достигнуты характеристики прочности, значительно превышающие уровень аналогичных характеристик материала после стандартной упрочняющей обработки (Т6). Однако оптимальное сочетание прочностных и пластических характеристик, весьма привлекательное для применения, достигается только после 4 циклов РКУП-ПК при 100°C, когда в материале была сформирована однородная УМЗ структура.

Исследована возможность дополнительной обработки УМЗ заготовок сплава 6061 холодной прокаткой при комнатной температуре с обжатием ~ 60-80 %. Установлено, что такая деформационная обработки позволила повысить прочностные свойства материала не менее чем на 30% за счет формирования в УМЗ состоянии развитой дислокационной структуры.

Таблица 2 Механические свойства алюминиевого сплава 6061 при комнатной температуре

| Обработка                 | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0.2}$ , МПа | $\delta$ , %   | $\psi$ , %     |
|---------------------------|------------------|----------------------|----------------|----------------|
| Т6                        | $230 \pm 4$      | $178 \pm 3$          | $30.0 \pm 1.0$ | $53.0 \pm 3.0$ |
| 1 цикл РКУП-ПК при 100°C  | $370 \pm 5$      | $335 \pm 4$          | $6.5 \pm 0.5$  | $20.0 \pm 2.0$ |
| 2 цикла РКУП-ПК при 100°C | $380 \pm 5$      | $350 \pm 5$          | $8.0 \pm 0.5$  | $30.0 \pm 1.5$ |
| 4 цикла РКУП-ПК при 100°C | $345 \pm 5$      | $305 \pm 5$          | $20.0 \pm 1.5$ | $37.0 \pm 2.0$ |
| 1 цикл РКУП-ПК при 150°C  | $355 \pm 5$      | $325 \pm 5$          | $11 \pm 1.5$   | $28.0 \pm 2.0$ |
| 4 цикла РКУП-ПК при 150°C | $360 \pm 4$      | $340 \pm 4$          | $11 \pm 1.5$   | $40.0 \pm 3.0$ |

Проведены фрактографические исследования УМЗ состояний сплава после РКУП-ПК и комбинированной обработки. Анализ изломов УМЗ образцов показал, что они имеют характерное, для вязких и пластичных материалов, ямочное строение и весьма схожи по типу с изломами, образовавшимися в образцах после обработки Т6, обладающих высокой пластичностью. Во всех исследованных состояниях центрами образования ямок, являются, преимущественно, грубые частицы примесных интерметаллидных фаз.

- [1] Патент РФ № 2181314. Устройство для равноканального углового прессования. Г.И. Рааб, Р.З. Валиев и др. // Оpubл. Б.И. 2002. №16.
- [2] MW.J.Kim, J.K.Kim, T.Y.Park *et al.* Enhancement of strength and superplasticity in a 6061 Al alloy processed by equal-channel-angular-pressing // Metallurgical and Materials Transactions A.V.33A.2002. P.3155-3164.